Über die Temperaturkorrektur selbstfedernder Barometerdosen

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades genehmigt von der
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Friedrich-Wilhelms-Universität
zu Berlin

Von

Rolf Machens
aus Braunschweig

Tag der mündlichen Prüfung: 22. September 1939
Tag der Promotion: 28. Februar 1940

Spezialbetrieb für Dissertationsdruck von Robert Noske in Borna-Leipzig
1941

N 33

Berichterstatter: Prof. Dr. Robitzsch
Prof. Dr. Defant

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Meinen Eltern

Inhalt.

Seite

Einleitung 1

Theorie 2

Prüfgerät 6

Versuchsanordnung 8

Prüfmethode 9

Dosenmaterial 12

Gang der Prüfung 13

Ergebnis und Ursachen 18

Kompensationsmethoden 21

Folgerungen 24

Zusammenfassung 26

Literatur 28

Abbildungen 29

Tabellen 35

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41550812_0212

Einleitung.

Zwei Arten von druckempfindlichen Hohlkörpern werden als Barometer verwendet: Bourdonrohr und Vidiedose.

Während beim Bourdonrohr die dem Luftdruck das Gleichgewicht haltende Kraft durch die Verformung des Rohres entsteht, wurde bei der Vidiedose diese bisher meistens durch eine innere oder äußere Stützfeder aufgebracht, und erst in neuerer Zeit ist man zu der Herstellung selbstfedernder Dosen übergegangen.

Die Angaben der Metallbarometer sind temperaturabhängig, denn

die Federkraft,
der Druck des eingeschlossenen Gasrestes,
die Längsdimensionen

sind Funktionen der Temperatur.

Der Notwendigkeit einer Temperaturkorrektion hat Wiebe [1] als erster durch empirische Ermittlung einer Korrektionsformel Rechnung getragen:

$$\Delta p = [m + n\,(760 - A)]\,\mathsf{T}$$

Hier bedeutete A die entsprechend einer bei einer bestimmten Temperatur aufgenommenen Eichkurve ermittelte Druckablesung, T die Temperaturdifferenz gegen die Eichtemperatur, m und n durch Eichungen bei verschiedenen Temperaturen ermittelte Konstanten. Durch Einführung anderer Konstanten kann die Formel in die heute übliche Form gebracht werden:

$$\Delta p = (a + b\,p')\,\mathsf{T} \tag{1}$$

$$p' = A$$
$$a = (m + 760\,n)$$
$$b = -n$$

In dieser Schreibweise wurde sie zuerst von Hergesell und Kleinschmidt [2] auf Grund theoretischer Überlegungen ermittelt und durch Versuche bestätigt. Diese erste für Bourdonrohre gegebene Ab-

leitung ergänzte Kleinschmidt [6] durch eine Übertragung der Theorie auf die Vidiedose, wobei er auch zu demselben Ergebnis gelangt. Die Ableitung geht von der Voraussetzung eines linearen Zusammenhanges zwischen Ausschlag und Dosenbelastung aus. Unter Einführung der oben angegebenen Temperaturabhängigkeiten und Vernachlässigungen höherer Potenzen der Temperaturkoeffizienten und der ausschlagsabhängigen Veränderung des Innenvolumens wird diese abgekürzte Korrektionsformel erhalten. Weitere theoretische Darstellungen finden sich bei Robitzsch [5], Jaumotte [9] und eine ausführliche Zusammenfassung bei Kleinschmidt [12].

Nicht nur die Einführung einer neuen von Robitzsch und Pfeiffer entwickelten selbstfedernden Dose, die sich durch sehr geringe elastische Nachwirkungen auszeichnet, sondern auch mehrfach in der Praxis des Wetterdienstes aufgetauchte Zweifel an dem Gültigkeitsbereich der Formel ließen eine Nachprüfung der Korrektionsverhältnisse an dem modernen Dosenmaterial wünschenswert erscheinen.

Die Genauigkeit einer Druckanzeige des Aneroids von $\pm 1/4$ mm Hg wurde als ausreichend angesehen. Es mußte daher nachgeprüft werden, ob bei der theoretischen Ableitung vernachlässigte höhere Glieder Einfluß außerhalb dieser Grenzen erlangen können, und ob die Versuchsergebnisse durch die alte Theorie erklärbar bleiben.

Theorie *).

Für die bei Normal-(Zimmer-)temperatur gewonnene Eichkurve gilt folgende Gleichgewichtsbedingung:

bei Eichtemperatur:

(2) $$p = \pi_0 + F_0 = p_0'$$

p = Außendruck
π_0 = Innendruck $(T = 0)$
F_0 = Federdruck $(T = 0)$
p_0' = Druckablesung $(T = 0)$

bei beliebiger Temperatur:

(3) $$p = \pi(T) + F(T) = p_0' + \Delta' p$$

$\Delta' p$ = Temperaturkorrektur

*) Dimension und Größenordnung der Konstanten siehe Tabelle 1a.

Der Innendruck ist eine Funktion der Temperatur

1. durch die Druckänderung $\pi = \pi_0 \ (1 + \alpha \mathsf{T})$
2. durch die Volumänderung der Dose $\pi = \pi_0 \dfrac{1}{(1 + \gamma \mathsf{T})^3}$

Glieder höherer Potenzen in der Korrektionsformel können noch dadurch entstehen, daß der Innendruck vom Ausschlag (angegeben in abgelesenen Druckwerten) abhängig ist. Es ist angängig diesen Zusammenhang wegen des kleinen Dosenhubs durch eine lineare Beziehung auszudrücken und zu setzen:

$$\pi = \pi_0 \, (1 + \beta \, p')$$

Zusammengefaßt ergibt sich:

(4) $$\pi (\mathsf{T}, p') = \pi_0 \frac{(1 + \alpha \mathsf{T})(1 + \beta p')}{(1 + \gamma \mathsf{T})^3}$$

Die Federkraft hängt von der Temperatur ab:

1. wegen der Veränderlichkeit des Elastizitätsmoduls:

$$F = F_0 \ (1 + \varepsilon \mathsf{T})$$

2. wegen der Veränderung der Dosenoberfläche:

$$F = F_0 \, (1 + \gamma \mathsf{T})^2$$

Zusammengefaßt:

(5) $$F (\mathsf{T}) = F_0 \, (1 + \varepsilon \mathsf{T}) \ (1 + \gamma \mathsf{T})^2$$

Bei der bisherigen Betrachtung der Temperaturkorrektion ($\Delta' p$) wurde die wegen der verschiedenen Ausdehnungskoeffizienten des Dosenbaustoffs und des Skalenmetalls (bzw. der an der Druckanzeige beteiligten Bauteile des Prüfgerätes) notwendige Verbesserung noch außer acht gelassen. Das verwendete Prüfgerät wurde aus Invar hergestellt, sodaß sein Ausdehnungskoeffizient gegenüber dem des Dosenmaterials (Berylliumbronze) vernachlässigt werden kann. Die wirkliche Ablesung ist daher nicht p_0', sondern $p' (\mathsf{T})$, die dann mit einer etwas anderen Verbesserung Δp den wahren Druck ergibt:

$$p_0' + \Delta' p = p' (\mathsf{T}) + \Delta p = p$$
$$\Delta p = p_0' + \Delta' p - p' (\mathsf{T})$$

Für p_0' ergibt sich (s. Abb. 1):

$$(P - p_0')\,(1 + \gamma\,\mathsf{T}) = (P - p')$$
$$p_0' = p'\,(1 - \gamma\,\mathsf{T}) + P\gamma\,\mathsf{T}$$

P = temperaturveränderliche Dosenhöhe in Eichwerten (mm Hg)

damit für Δp:

$$\underline{\Delta p = \Delta' p - \gamma\, p'\,\mathsf{T} + P\gamma\,\mathsf{T}} \tag{6}$$

Werden (4) und (5) in (3) eingesetzt und noch (6) berücksichtigt, dann folgt aus der Rechnung für Δp eine Reihe mit steigenden Potenzen von p' und T, die bis zu Gliedern 3. Ordnung betrachtet werden soll:

$$\Delta p = (a + b\,p' + c\,p'^2 \ldots)\,\mathsf{T} + (d + e\,p' + \ldots)\,\mathsf{T}^2 + (f + \ldots)\,\mathsf{T}^3 \tag{7}$$

Für die Koeffizienten ergibt die Rechnung die Tabelle 1 b. Aneroide als Druckindikatoren finden hauptsächlich in der Aerologie Anwendung. Um die dort bei bestimmten Wertepaaren p', T auftretenden Maximalwerte der einzelnen Glieder abschätzen zu können, wird ein einfacher Zusammenhang zwischen $p\,(\approx p')$ und T angenommen:

$$\underline{\mathsf{T} = p/10 - 85} \tag{8}$$

Daß diese Annahme zu einer solchen Abschätzung geeignet ist, zeigt ein Vergleich mit der mittleren Temperaturverteilung über Lindenberg (Abb. 2). Die Absolutbeträge der Konstanten, die maximal mit $^1/_4$ mmHg den Betrag der Korrektur beeinflussen, zeigt Tabelle 1 c.

Die Berechnung der Koeffizienten aus den angegebenen Konstanten ergibt, daß nur die unterstrichenen Glieder diese Grenzen überschreiten und außerhalb der verlangten Genauigkeit Einfluß erlangen. Abweichungen von der mittleren Temperatur-Höhenkurve, die die Werte der Tabelle 1 b beeinflussen, finden wir nur in extremer Bodenkaltluft. Etwa bei dem Wertepaar $p = 750$ mmHg, $\mathsf{T} = -50^0$ werden bei b und e die Minimalbeträge unterschritten: $b : 0{,}7 \times 10^{-5}$, $e : 1{,}2 \times 10^{-7}$. Es müßte dann in der Formel (9) noch das Glied: $\pi_0 \beta\,(a - 3\gamma)$ aus Tabelle 1 b berücksichtigt werden. Praktisch bleibt dieser Fall bedeutungslos, weil die Korrektion des Bodenwertes nicht nach einer Formel, sondern durch direkten Vergleich mit der Barometerablesung gewonnen wird. Die endgültige Korrektionsformel lautet daher:

$$\underline{\underline{\Delta p = [\pi_0\,(a - \varepsilon) + P\gamma + (\varepsilon + \beta)\,p']\,\mathsf{T}}} \tag{9}$$

$$a = \pi_0\,(a - \varepsilon) + P\gamma \approx 0{,}18$$
$$b = \varepsilon + \gamma \approx -4 \cdot 10^{-4}$$

Diese beiden Koeffizienten können aus 2 Eichungen bei möglichst verschiedenen Temperaturenn ermittelt werden. Es wird dann jedoch in der Regel die Korrektion als Funktion des wahren Drucks und der Temperatur dargestellt, während die abgeleitete Formel die zu verbessernde Druckablesung enthält:

Eichung:

(10) a) $\Delta p\,(T, p) = (a' + b' p \ \ldots)\,T$

Korrektur:

b) $\underline{\Delta p\,(T, p') = (a + b\,p')\,T}$

$\underline{\underline{\Delta p\,(T, p') = \Delta p\,(T, p)\ !}}$

Aus diesen Bedingungen lassen sich a und b durch die Koeffizienten der Eichung ausdrücken:

$$a = a' + d\,T \qquad\qquad d = a\,b$$
$$b = b' \qquad\qquad \approx -7 \times 10^{-5}$$

Umgekehrt ergeben $a' = a - d\,T$ und $b' = b$ in (10 a) eingeführt die nach der Theorie bei der Eichung zu erwartenden Konstanten:

$$\Delta p\,(T, p) = (a - d\,T + b\,p)\,T$$

(11) $$\Delta p\,(T, p) = (a + b\,p)\,T - d\,T^2$$

Aus der Eichung bei mindestens 3 Temp. müßte also das T^2-Glied das maximal bei $T = -85^0$ etwa ½ mmHg ausmacht, ermittelt werden können.

Die Versuche zeigen, daß tatsächlich die Korrektur in dieser Form dargestellt werden kann. Die Größenordnung des experimentell gefundenen quadratischen Gliedes stimmt jedoch nicht mit der des hier abgeleiteten Koeffizienten d überein. Um dies anzudeuten, wird für die aus den Versuchen abgeleiteten Glieder der *-Index eingeführt. Wie weit diese neuen Koeffizienten physikalisch erklärt werden können, wird bei der Diskussion der Versuchsergebnisse besprochen.

Im ganzen ergibt die kritische Betrachtung der Hergesell-Kleinschmidtschen Formel, die in (9) noch einmal dargestellt wurde, keine Anhaltspunkte über eine Unzulänglichkeit dieser Korrektionsmethode, da nach wie vor die physikalischen Voraussetzungen bestehen bleiben. Auch die in (11) angegebene Abweichung, die aus dem Unterschied der Berechnung und des Weges der praktischen Ermittlung

der Koeffizienten folgt, kann hierfür nicht herangezogen werden, da die in der Praxis übliche Genauigkeit nur etwa ± 1 mmHg beträgt.

In Abb. 3 sind die Korrekturen unter der Annahme der Zustandskurve (8) für verschiedene a-Werte dargestellt. Die Schnittpunkte der Kurven mit der Abszisse sind die Kompensationsdrucke, für die die Korrektur bei jeder Temperatur verschwindet:

$$(a + b p'_c) = 0 \tag{12}$$

$$\underline{p'_c = -a/b}$$

Am günstigsten liegen die Korrekturen bei Kompensationsdrucken zwischen 100 und 250 mmHg. Nicht nur wegen der kleinstmöglichen Beträge der Korrekturen, sondern auch deswegen, weil dann der besonders wichtige Druck an der Stratosphärengrenze fast ohne Korrektur erhalten werden kann.

Prüfgerät.

Die experimentelle Nachprüfung der Korrektionsverhältnisse verlangte die Durchführung von Druckeichungen bei verschiedenen Temperaturen. Es war ein Prüfgerät zu bauen, das gegen Temperatureinflüsse möglichst unempfindlich war und eine genügend genaue Messung ermöglichte. Um geringen Beobachtungsaufwand während der Messung zu erzielen, wurde eine Registriervorrichtung gewählt.

Der Aufbau des Prüfgeräts, das bis auf besonders erwähnte Teile aus Invar angefertigt wurde, war folgender (Abb. 4):

Unterhalb einer 3 mm starken Grundplatte ist an zwei Säulen ein Querstück abnehmbar befestigt, das die zu prüfende Dose trägt. Der freie Zapfen der Dose ragt durch ein Loch der Grundplatte etwa 3 mm über diese empor. Durch aufgesetzte Invarstiftchen mit sauber abgeschliffenen Endflächen wurden die bei den einzelnen Dosen verschiedenen Bauhöhen ausgeglichen. Auf dieser freien Endfläche ruht die Spitze eines an einer Blattfeder gelagerten Hebels. An seinem vorderen Ende ist eine schwache verstellbare Feder befestigt, die einen kleinen Diamanten trägt, der so justiert ist, daß Diamant- und Hebelspitze in einer horizontalen Achse liegen. Um annähernd gleiche Ausdehnungskoeffizienten für Feder und Federträger zu erreichen und damit Spannungen in der Lagerung der Schreibfeder zu vermeiden, die bei Temperatur-

änderungen Fehlregistrierungen hervorrufen könnten, wurde der Spitzenteil des Hebels aus Eisen angefertigt, während der Hauptteil aus Messing besteht. Der Diamant ritzt seine Bewegung auf ein Glasplättchen ein, das senkrecht vor einer in der Grundplatte eingelassenen Invarfeder befestigt ist. Diese Invarfeder ist in ihrem oberen Teil als Anker ausgebildet und kann durch Einschalten zweier seitlicher Magnete um kleine Ausschläge wahlweise nach beiden Seiten aus der Ruhelage abgelenkt werden. Dadurch werden Querstriche bei bestimmten beobachteten Drucken erzeugt.

Besondere Schwierigkeiten waren — neben der Dimensionierung der Federn und Magnete, der Lagerung der Glasplatte, der Regulierung der Strichstärke des Diamanten — bei der Ausbildung des Hebels zu überwinden. Es mußte besonders auf seitliche Steifheit geachtet werden. Auch mußte das verwendete Material vollkommen verdrehungsfrei verarbeitet werden. Andernfalls traten temperaturabhängige Drehungen um die Längsachse des Hebels auf, die die Registrierung fälschten. Schließlich wurde er nach längeren Versuchen als spitzes Dreieck mit T-förmigem Querschnitt gebaut. In dieser Form genügte er den gestellten Ansprüchen.

Das Prüfgerät gestattet eine vollkommen unverzerrte von Übersetzungsverhältnissen unbeeinträchtigte Registrierung des Dosenhubs. Durch die Verwendung eines Messinghebels über der Invargrundplatte gelang es, die bei verschiedenen Temperaturen aufzunehmenden Eichungen ohne Wechsel des Glasplättchens nebeneinander aufzuzeichnen und untereinander vergleichbar zu machen. Die Auswertungen der Ritzungen wurden mit einem etwa 100fach vergrößerndem Mikroskop vorgenommen, dessen Mikrometereinteilung eine Schätzung auf $\pm$ 0,002 mm zuließ. Bei einem Dosenhub von durchschnittlich 3 mm für etwa 700 mmHg Druckdifferenz entsprach sie einer Auswertungsgenauigkeit von etwa $\pm$ ½ mmHg.

Die durch Temperaturänderung hervorgerufenen kleinen Wege der Hebelspitze über der Glasplatte waren wegen der Verwendung gleichen Materials bei allen an der Ausdehnung beteiligten Bauteilen gering. Sie wurden dadurch ermittelt, daß an Stelle einer Dose ein Invarstift eingespannt wurde. Diese Korrektur war stets linear von der Temperatur abhängig und wurde öfters zwischen den Versuchen nachgeprüft. Die temperaturabhängige Veränderung des Hebeldrucks auf die geprüfte Dose, konnte wegen der Kleinheit des Hebeldrucks selber vernachlässigt

werden. Da keine Anhaltspunkte darüber vorlagen, ob durch Reibung ein Nachhinken des nur an einer schwachen Feder angebrachten Diamanten gegenüber der Bewegung der Hebelspitze stattfand, wurde die Bewegung einer auf $^1/_{1000}$ mm einstellbaren Mikrometerschraube im Auf- und Abwärtsgang aufgenommen, wobei keine Differenzen festzustellen waren. Das Gerät arbeitete ohne jedes mechanische Spiel, das bei der Verwendung einer Übersetzung und damit notwendiger Drehlager unvermeidlich geworden wäre.

Bei wiederholten Prüfungen derselben Dose wurde jede Dose in das gleiche Prüfgerät — insgesamt waren drei solcher Geräte gebaut worden — eingespannt, so daß die Ergebnisse ohne Beachtung der Gerätekorrektur vergleichbar waren.

Versuchsanordnung.

Die Versuchsanordnung bestand aus einem Kastenrezipienten, einer Ölpumpe und einem Gefäßbarometer mit einem Meßbereich bis 60 mmHg. Zur Temperaturmessung dienten Thermoelemente (Kupfer-Konstantan), die unmittelbar an ein „Multiflex"-Galvanometer angeschlossen wurden.

Der Rezipient war fast vollkommen durch ein doppelwandiges Messinggefäß ausgefüllt, so daß über dem Temperaturbad nur ein sehr kleiner Luftraum entstand. Der Raum zwischen Kühlgefäß und Rezipient wurde mit Preßkorkplatten ausgefüllt. Etwa 5 cm über dem Boden des Kühlkastens wurde eine Aluminiumplatte eingelegt, die die Prüfgeräte und Thermoelemente aufnahm. Durch das im Rezipienten übrigbleibende geringe Luftvolumen wurde nicht nur das Auspumpen sehr erleichtert, sondern es konnte auch von der Vortemperierung der beim Abstieg einströmenden Luft abgesehen werden. Durch einen Gummistopfen wurden die für die Thermoelemente und zur Auslösung der Magnete nötigen Leitungen luftdicht eingeführt.

Um einen Einblick in Temperaturverteilung und Temperaturgang zu erhalten, wurden acht Thermoelemente in einer Ebene, die der Lage der untersuchten Dosen entsprach, angebracht und längere Zeit beobachtet (Abb. 5). Bei den Extremen (-80^0, $+50^0$ gegen Zimmertemperatur) wurde ein Gang von etwa $1—2^0$ in 10 Min. beobachtet, der an allen Meßpunkten gleich war.

Die räumliche Temperaturverteilung zeigte die erwartete Symmetrie. Die horizontalen Differenzen zwischen zwei benachbarten Lötstellen stiegen nicht über 0,2° an, während die vertikalen Differenzen 0,5°/cm nach dreistündigem Warten erreichten. Es war daher unnötig bei den Versuchen — eine Messung bei einer Temperatur dauerte höchstens 20 Min. — den Temperaturgang an mehreren Stellen zu beobachten und die räumlichen Differenzen zu berücksichtigen, zumal durch die Dosen selber die Unterschiede noch verringert wurden. So wurde bei allen Messungen später nur der Temperaturgang an der Hauptmeßstelle aufgenommen. Die zweite Lötstelle des Thermoelementes wurde in einer mit Wasser gefüllten Thermosflasche auf Zimmertemperatur gehalten und ihre Temperatur bei Beginn und Ende eines Versuchs gemessen.

Besonders nach schnellem und tiefem Auspumpen war es nötig, das Vakuum des Barometers zu prüfen. Grundsätzlich wurde es vor jeder Hauptmessung wieder neu hergestellt. Nach einiger Übung erwies sich als beste Meßmethode die Beobachtung der Bewegung der Quecksilberkuppe und Auslösung der Markierung im Augenblick des Durchtritts der Kuppe durch die Visierebene des vorher eingestellten Nonienschiebers. Die Druckänderung konnte im Auf- und Abstieg sehr fein einreguliert werden, so daß es möglich war, durch ständiges Klopfen für eine stets gleiche Ausbildung der Kuppe zu sorgen. Gleichzeitig mit der Einschaltung der Magnete beleuchtete eine kleine am Schieber befestigte Glühbirne die Fläche hinter der Quecksilbersäule, wodurch Fehlauslösungen sofort erkannt werden konnten.

Durch die Dichteänderung des Bades mit der Temperatur entstand an den Dosen ein geringer Druckgang. Dieser konnte ebenso wie die Temperaturkorrektur des Barometers — der Temperaturgang am Barometer blieb während einer vollständigen Prüfung unter 1° — vernachlässigt werden.

Prüfmethode.

Die Temperatur- und Druckstufen mußten so gewählt werden, daß der Aufgabe entsprechend etwaige höhere Korrektionsglieder erkannt werden konnten.

Als Temperaturintervalle wurden ausgehend von etwa — 55° C 25°-Stufen ausgewählt, deren Temperatur als Differenzen gegen die Normaleichtemperatur (= Zimmertemperatur etwa 20° C) angegeben werden:

Badflüssigkeit	Alkohol			Öl		
Stufe (m)	— 3	— 2	— 1	0	1	2
°C	—55	—30	— 5	20	45	70
T_m	—75	—50	—25	0	25	50

Bei jeder Temperaturstufe wurde in Abständen von ~ 100 mmHg die Druckeichung durchgeführt:

Stufe (n)	0	1	2	3	4	5	6	7	
p_n	60	150	250	350	450	550	650	750	mmHg

Die ausgewerteten Ausschläge wurden dann entsprechend der Eichung bei $T = 0$ in scheinbare Druckwerte (p') umgewandelt. Ihre Differenzen gegen die Normaleichung ergaben die gesuchte Temperaturkorrektur, die als Funktion von Druck und Temperatur dargestellt werden konnte.

Der Koeffizient b der Korrektionsformel (9) wurde auf folgende Art aus 4 p'-Werten ermittelt:

$$p'_{m,n} - p'_{m-3,n} = (a + b\,p_n)\,(T_m - T_{m-3}) \quad = \Delta p_n$$

$$-[p'_{m,n-4} - p'_{m-3,n-4}] = (a + b\,p_{n-4})\,(T_m - T_{m-3}) = \Delta p_{n-4}$$

(13)
$$b = \frac{\Delta p_n - \Delta p_{n-4}}{(p_n - p_{n-4})\,(T_m - T_{m-3})}$$

Aus den 48 p'-Werten wurde so ein Schema von 12 voneinander unabhängigen b-Werten bestimmt, aus dem eine etwaige Druck- oder Temperaturabhängigkeit von b abgeleitet werden sollte.

Als nach der ersten Versuchsserie sich eine Prüfung der Dosen oberhalb Zimmertemperatur als unzweckmäßig erwiesen hatte, und b innerhalb der verlangten Grenzen konstant blieb, wurde seine Bestimmung nur noch aus den Temperaturstufen — 3 bis 0 und den Drucken 100, 300, 500, 700 mmHg durchgeführt.

Der druckunabhängige Teil der Korrektur wurde auf folgende Weise dargestellt:

$$\Delta p_{m,n} = (p'_{o,n} - p'_{m,n}) = (a + b\,p_n)\,T_m$$

(14)
$$a\,T_m = \Delta p'_{m,n} - b\,p_n\,T_m = A\,(T)$$

Jede Druckstufe lieferte so einen A-Wert. Der Mittelwert aus allen 8 bzw. 4 Werten wurde für die Zeichnung und Berechnung benutzt.

Während bei den ersten Messungen im Auf- und Abstieg beobachtet, wurde und die Mittelwerte für die Korrektion zugrunde gelegt wurden, wurde später nur noch im Abstieg gemessen, nachdem die Gleichheit der Korrektion in beiden Teilen des Druckzyklus erwiesen war. Dadurch konnte die Versuchsdauer soweit herabgedrückt werden, daß der Temperaturgang unbedeutend wurde. Weil in der Praxis die Eichung der Geräte zur Ausschaltung mechanischer (Lagerspiel, Nachhinken durch Reibung usw. — Becker [4] —) und elastischer Fehler nur im Aufstieg vorgenommen wird, war diese Methode berechtigt. Es ist auch der Theorie nach zulässig die Korrektion nur in einem Teil des Druckzyklus zu bestimmen, weil der Ansatz lediglich die Temperaturveränderlichkeit der elastischen Kraft beachtet, ohne Rücksicht auf den Zusammenhang zwischen Belastung und Dosenhub, in dem sich Auf- und Abstieg durch die Hysteresis unterscheiden. Allerdings mußte dann auf gleiche Aufstiegdauer und gleiches Druckintervall bei jeder Messung geachtet werden. Aus diesen Gründen blieben die elastischen Fehler ohne wesentliche Bedeutung für die Korrektionsermittlung, so daß es ausreichte, aus den ersten Versuchen Mittelwerte der Schleifenbreiten zur Kennzeichnung der elastischen Eigenschaften abzuleiten.

Unter Berücksichtigung der Auswertungsgenauigkeit der Registrierung läßt sich aus (13) und (14) die zu erwartende Streuung der b und $A\,(\mathsf{T})$ ableiten, falls sich die Korrektur entsprechend der Theorie durch ein druckabhängiges und reines Temperaturglied darstellen läßt. Jeder p-Wert wurde aus vier Ablesungen bei veränderter Lage des Mikrometers gewonnen, von denen jede auf $\pm\,{}^1/_2$ mmHg genau war. Dem Mittelwert konnte eine Streuung von $\pm\,{}^1/_4$ mmHg zugeschrieben werden. Bei einer Druckdifferenz von 400 mmHg und Temperaturdifferenz von 75° (bzw. 50°) liefert (13) als mittleren Fehler für b:

$$\delta b = \pm\,0{,}33 \times 10^{-4} \quad (\text{bzw. } \pm\,0{,}5 \times 10^{-4})$$

und (14) für jedes $A\,(\mathsf{T})$, das sich aus der Differenz zweier p' direkt ableitet:

$$\delta A = 0{,}5 \text{ mmHg}.$$

Dosenmaterial.

Vier verschiedene Hersteller hatten Dosen für diese Untersuchung zur Verfügung gestellt. Insgesamt wurden 16 Stück von 8 verschiedenen Typen geprüft. Eine Zusammenstellung der Dosen gibt Tabelle 2, und Abb. 6 zeigt sie in ihrer äußeren Form.

Soweit über das Dosenmaterial etwas zu erfahren war, wurde bei allen Berylliumbronze verwendet, die zur Erreichung besserer elastischer Eigenschaften gehärtet wurde. Über ihre Fabrikationsmethoden, vor allem über das Lötverfahren äußerten sich die Hersteller ungern. Allgemein hielten sie es für ausgeschlossen, daß irgendwelche Rückstände der Lötmittel in den Dosen zurückbleiben könnten.

Beachtlich ist die bei den einzelnen Dosentypen verschiedene Zusammenfügung der Schalenränder. Während bei den Gruppen B a, B b, B c, D diese sehr eng aufeinandergepreßt sind, so daß nur eine sehr dünne Zinnschicht die Schalen verbindet, wölben sich bei C a und C b die Ränder etwas nach außen. Die so entstehende Kerbe von etwa 1 mm Höhe ist vollkommen mit Lötzinn ausgefüllt. Bei der Dose E liegt zwischen beiden Schalen noch ein besonderer flacher Ring, der die Verbindung vermittelt.

Sonst zeigen alle Typen in der äußeren Form weitgehende Ähnlichkeit. Die Riefelung der Oberflächen besteht bei den wichtigsten Typen aus drei in Höhe und Breite vom Rand her abnehmenden Rillen. Nur bei C b sind es 6.

Die Empfindlichkeit geht auch aus Tabelle 2 hervor. Bei den für Höhenmesser verwendeten Typen C b, E nimmt sie mit sinkendem Druck zu.

Die zur Verfügung stehenden Dosen stellten bis auf die Dose G, deren Untersuchung zeigen sollte, ob grundsätzliche Unterschiede in der Temperaturkorrektion zwischen selbstfedernden und mit Stützfedern ausgerüsteten Dosen bestehen, das modernste Material dar.

Gang der Prüfung.

Nach der üblichen Massage von etwa 10 Belastungszyklen wurden einzelne Dosen der verschiedenen Typen nach dem angeführten ausführlichen Schema geprüft. Die Vorgeschichte der Dosen vor ihrer ersten Prüfung war folgende: Die Dosen B a waren einmal in den Stufen — 3 bis 2 bereits belastet worden, die Registrierung war jedoch nicht auswertbar. Dasselbe gilt für die Dosen C b 1 und D 2, während B c 1, B c 2 und C a 1 noch keine Belastung bei anderer als Zimmertemperatur durchgemacht hatten. Die Dosen B b waren aus mehrfach bereits benutzten Meteorographen ausgebaut worden, ihre Vorgeschichte daher nicht genau bekannt.

Betrachten wir zuerst das Ergebnis in bezug auf den Faktor b der Korrektionsformel (9). In Tabelle 3 stellt das Schema der Einzelwerte, die an der Dose B a 2 gewonnen wurden, die b-Werte in Abhängigkeit der Temperatur- und Druckstufen dar. Eine klare funktionelle Beziehung $b\,(T, p)$ ist nicht zu erkennen. Der Fehler des Mittelwertes aller bleibt mit etwa $\pm 0{,}2$ innerhalb der durch die Beobachtungsgenauigkeit erklärbaren Grenze von $\pm 0{,}33 \times 10^{-4}$. Dasselbe Bild zeigt sich auch bei den anderen Dosen. Eine Ausnahme macht B c 2, aus deren b-Schema vom 28. 4. (Tab. 3) eine Zunahme mit steigendem Druck und sinkender Temperatur scheinbar hervorgeht. Ein Urteil über das Verhalten dieser Dose mußte also einer Nachprüfung noch vorbehalten bleiben.

Es wurden nun in den Temperaturstufen — 3 bis 0 die Mittelwerte von b gebildet, und mit diesen Werten nach Formel (14) die $A\,(T)$ berechnet. Die b-Werte der über Zimmertemperatur liegenden Eichungen wurden nicht berücksichtigt, um in dem, den wirklich vorkommenden Temperaturen entsprechenden, Temperaturintervall die bestmögliche Annäherung zu erreichen. Die Werte $A\,(T)$ zeigten bei einer Temperaturstufe innerhalb der zu erwartenden Genauigkeit bei allen Dosen Konstanz. Damit war bereits die Möglichkeit der erschöpfenden Darstellung der Temperatur-Korrektur durch ein linear druckabhängiges und reines Temperaturglied erwiesen.

In den Abb. 7—10 werden für einzelne Dosen der Verlauf der Korrekturen bei bestimmten Temperaturen dargestellt. Die durch die Meßpunkte gelegten Graden sind aus den Mittelwerten der b und $A\,(T)$

entstanden, stellen also die beste Annäherung für den Temperaturbereich — 3 bis 0 dar.

Die Darstellungen zeigen, daß sich bei keiner Dose ein Kompensationsdruck, der sich in einem Schnittpunkt aller Linien zeigen müßte, scharf angeben läßt. Besonders trifft dies für die Gruppen C a und D zu. Die Kurven 11—14 und 15 a geben den Verlauf $A(T)$. Die Unschärfe des Kompensationsdrucks ist darauf zurückzuführen, daß A eine mehr oder weniger nicht lineare Funktion von T ist. Zur Darstellung dieses Gliedes reicht also die Korrektionsformel, die nur ein lineares Temperaturglied vorsieht, nicht mehr aus.

Es liegt daher nahe die Korrektionsformel durch ein quadratisches Temperaturglied zu erweitern. Es wird also statt $\Delta p = (a + b\,p)\,T$ die Form

$$\Delta p = (a^* + b\,p)\,T + d^*\,T^2 \tag{15}$$

gesetzt. Auf S. 5 war bereits diese Ergänzung erwähnt worden und darauf hingewiesen, daß die Konstanten a und d der Formel (11) von a^* und d^* der Formel (15) unterschieden werden müssen.

Die Koeffizienten wurden auf folgende Weise graphisch ermittelt:

Beispiel D 2 (Fig. 13 I):

Es werden die Differenzen der an den Stellen $T = 80^0$, -40^0, 0^0 inter- bzw. extrapolierten $A(T)$ gebildet (Punkte 1, 2) und den Temperaturen -60^0, -20^0, den Intervallmitteln, zugeordnet (Punkte 3, 4). Ihre Verbindungslinie stellt die graphisch aus 40^0-Intervallen ermittelte 1. Ableitung von $A(T)$ dar. Die Punkte 5 und 6 geben die Steigung der Stammfunktion an den Stellen -50^0 und 0^0. Nun gilt nach (14):

$$A(T) = a \cdot T = (a^* + d^*\,T)\,T$$

$$\frac{\Delta A}{\Delta T} = a^* + 2\,d^*\,T \qquad \Delta T = 40^0$$

$$\left(\frac{\Delta A}{\Delta T}\right)_0 = a^*; \quad \left(\frac{\Delta A}{\Delta T}\right)_{-50} - a^*/2T = d \qquad T = -50^0$$

Der Druck bei dem die Korrektur 0 wird, ist bei einem notwendigen quadratischen T-Glied noch von der Temperatur abhängig. Es gibt also keinen Kompensationsdruck mehr:

$$(a^* + d^*\,T + b\,p) = 0 \tag{16}$$

$$p^* = -a^*/b - d^*/b \cdot T \quad \text{(Tab. 8, Spalte 9)}$$

Der linearen Korrektur entsprechen in den Zeichnungen die Strich-Punkt-Graden. Die größte Abweichung gegen den durch eine quadratische Funktion angenäherten Verlauf $A(T)$ ergibt sich bei $T = -40^{\circ}$ und ist aus Spalte 6 ersichtlich. Daß diese Art der Annäherung ausreicht, zeigen die in Fig. 13 I eingezeichneten berechneten kleinen Punkte.

Eine Nachprüfung der Korrekturen durch mehrfache Wiederholungsmessungen wurde nun bei den Dosen B a 2 und B c 2 vorgenommen und das Ergebnis in Tabelle 6 zusammengestellt. Bereits die zweite Prüfung von B c 2 unterscheidet sich in der Verteilung der b-Werte wesentlich von der ersten (Tab. 3). Die Abhängigkeit von Druck und Temperatur ist nicht mehr erkennbar und die Verteilung entspricht mit zunehmender Prüfungszahl immer mehr den bei den anderen Dosen gewonnenen Verhältnissen,

daß b unabhängig von T und p ist.

Dasselbe Verhalten war auch bei der Dose B c 1 festzustellen.

Die zweite Prüfung der Dose B c 2 am 7. 6. ergab daneben noch eine Verringerung des b-Wertes und eine starke Abnahme des Betrages der $A(T)$. Daraus war zu schließen, daß beide Korrektionsanteile von der Anzahl der vorhergegangenen Belastungen bei verschiedenen Temperaturen abhängig waren. Wenn dies der Fall ist, muß auch der Temperaturbereich selbst von Einfluß sein. Um nun aber die Untersuchungen möglichst den wirklichen Verhältnissen anzupassen, wurden daher die Temperaturstufen oberhalb $T = 0$ bei den folgenden Prüfungen fortgelassen und zu dem oben erwähnten verkürztem Untersuchungsschema übergegangen. Dies wurde gerechtfertigt durch das Ergebnis einer Prüfung innerhalb der Untersuchungsserie von B a 2 und B c 2, vor der die Dosen auf etwa 100° C erhitzt worden waren. Bei beiden Dosen ließ sich ein Ansteigen von b und $A(T)$ feststellen, während mit fortschreitenden Eichungen innerhalb eines konstanten Temperaturbereiches eine Abnahme dieser Werte bis zur Annäherung an einen konstanten Betrag beobachtet wurde (Tab. 6). Die Stetigkeit, die in der Veränderung von b sich ergab, zeigte sich bei den $A(T)$, die bedeutend stärker streuten, jedoch nicht.

Zu Tabelle 6 ist noch erläuternd hinzuzufügen: S_{-3} und S_0 stellen den gesamten Dosenhub bei einer Druckänderung um 600 mmHg in den beiden Temperaturstufen dar. Einer Einheit entsprechen 0,002 mm. Eine Änderung des Faktors b im Verlaufe der aufeinanderfolgenden Prüfungen mußte in einer Änderung der Dosenempfindlichkeit in diesen

beiden Stufen erkennbar sein. Das Verhalten der Dosen ist jedoch nicht einheitlich. Während bei Ba 2 sich die Empfindlichkeit bei T_0 kaum änderte, auch durch die Erhitzung fast unbeeinflußt blieb, allerdings bei T_{-3} am 21. 7. sich plötzlich verringerte, um sich dann wieder langsam zu erholen, blieb bei Bc 2 S_{-2} am wenigsten beeinflußt und S_0 zeigte nach der Erwärmung einen deutlichen Anstieg. Überhaupt sind die elastischen Eigenschaften dieser Dose nicht so gut, wie die stärkere Streuung der Empfindlichkeit erkennen läßt.

Aus dem Ergebnis der Untersuchungsserie dieser beiden Dosen konnte gefolgert werden, daß die Ermittlung der Temperaturkorrektur erst nach einer bestimmten Temperaturvorbehandlung erfolgen darf, wenn Ergebnisse gewonnen werden sollen, die auch noch als Grundlage der Korrektur späterer Aufstiege gelten können. Besonders stark änderte sich die Korrektur von der ersten zur zweiten Messung (Bc). Leider konnte dies an anderen Serien nicht mehr festgestellt werden, weil die Registrierungen der ersten Prüfungen nicht auswertbar waren. Eine einfache Massage bei Zimmertemperatur, die ursprünglich auch nur den Zweck der Herstellung der Hysteresis hat, reicht nicht aus.

Eine Belastung der Dosen bei den Temperaturstufen — 3 bis 0 an drei aufeinanderfolgenden Tagen wurde als genügende Alterung angesehen und sämtliche Dosen entsprechend behandelt.

Aber auch die nun folgenden Untersuchungen der restlichen Dosen, wurden zum Teil mehrfach wiederholt, um in der Größe der Abweichungen verschiedener Bestimmungen der Temperaturkorrektur ein Maß der Streuung zu erhalten. Außer bei den Dosen Ba und Bc, bei denen in den Fig. 11, 12 die erste (gestrichelt) und letzte (ausgezogen) Prüfung dargestellt ist, zeigen diese Kurven bei den übrigen Dosen in ihrer Abweichung voneinander etwa die Unsicherheit an.

Zwei Dosen, Ca 2, Ca 3, verhielten sich im Gegensatz zu Ca 1 sehr merkwürdig. Selbst nach längerer Temperatur-Druckbehandlung blieb b im Mittel sehr groß und die Einzelwerte temperatur- und druckabhängig (Tab. 4). Während $A(T)$ bei Ca 1 in den Wiederholungsprüfungen durchaus dem Verhalten anderer Dosen entspricht, ergibt sich bei den beiden übrigen Dosen dieser Gruppe eine Zunahme der Temperaturkorrektur mit sinkender Temperatur in noch stärkerem Maße als bei den Dosen Cb, die sich ähnlich verhalten. So starke Abweichungen des Verhaltens einzelner Dosen derselben Gruppe untereinander waren

sonst bei keinem Typ zu beobachten, so daß die zeichnerische Darstellung einer Musterdose bei diesen Gruppen genügte.

Da häufig bei der Ableitung der Korrektionsformel die Voraussetzung eines linearen Zusammenhangs zwischen Druck Ausschlag gemacht wird, interessierte das Verhalten solcher Dosen, bei denen dies nicht mehr zutrifft (C b, E). Diese Voraussetzung ist für die Ableitung unwichtig und wurde daher auch in dem ersten Teil der Arbeit nicht gemacht. Es bestätigte sich in dem Ergebnis, das an den angeführten Dosen erhalten wurde. Tabelle 5 gibt die Einzelwerte für b an, und die Fig. 16, 17 $A(T)$. Beides entspricht dem an den übrigen Dosen Gewonnenen.

Diese beiden Typen werden vornehmlich als Höhenmesser verwendet. Es wurde also bei ihrer Entwicklung darauf geachtet, daß ihre Empfindlichkeit mit zunehmender Höhe wächst. Setzt man den Zusammenhang zwischen Druck und Ausschlag:

$$ds = \sigma\, dp,$$

und soll $ds = dh \cdot \text{const.}$ sein, dann muß

$p\sigma = \text{const.}$ sein, weil nach der statischen Grundgleichung $dh = dp/p \cdot \text{const.}$

Nach Tabelle 7 trifft dies bis etwa 400 mmHg (5000 m Höhe) ganz gut zu.

In der Tabelle 8 sind nun alle gewonnenen Ergebnisse für jede untersuchte Dose zusammengestellt. Die Spalten 2 und 3 geben die Werte zweier Eichungen. Den ausgezogenen Kurven der Fig. 11—17 entsprechen die zuletzt gemessenen Werte (obere Reihe), die auch der Berechnung der in den folgenden Spalten angeführten Zahlen zugrunde liegen, während die eingeklammerten Zahlen den gestrichelten Kurven der Zeichnungen entsprechen und das Ergebnis der ersten Eichungen darstellen. Der obere Wert in Spalte 4 ist ein aus zwei $A(T)$-Werten (T_{-3}, T_0) entsprechend der üblichen Korrektion ermitteltes a, dessen zugehöriger Kompensationsdruck der Spalte 9 zu entnehmen ist. In diesen a-Werten ist noch ein Anteil enthalten, der aus den Ausdehnungsfehlern des Prüfgerätes herrührt. Dieser Fehler in a beträgt für alle Geräte $+0{,}035$. Er ist nicht berücksichtigt worden, weil auch so die einzelnen Ergebnisse untereinander vergleichbar sind und die Einflüsse der Gerätekorrektion der gebäuchlichen Meteorographen wesentlich größer sind.

Der Vollständigkeit halber und um einen Begriff von den elastischen Eigenschaften der Dosen zu geben, ist in Spalte 7 die mittlere Breite der Hysteresis für $T = 0$ angegeben.

Ergebnis und Ursachen.

Um den Gang der Prüfungen verständlich zu machen, mußten zum Teil schon in den vorigen Abschnitten Ergebnisse vorweggenommen werden, die in diesem Kapitel noch einmal zusammenfassend diskutiert werden sollen.

Die Grundaufgabe der Arbeit, die Nachprüfung der Hergesell-Kleinschmidtschen Korrektionsformel an modernem Dosenmaterial, hatte gezeigt, daß bei der Mehrzahl der Typen noch ein quadratisches Temperaturglied Einfluß gewinnt. Aus dem theoretischen Ansatz kann dieser Korrektionsanteil nicht erklärt werden. Auch ist es nicht möglich in der theoretischen Ableitung einen grundsätzlichen Unterschied zwischen selbstfedernden und gestützten Dosen zu machen. Dies bestätigte sich in der Prüfung der Dose G, die in ihrem Verhalten keinen wesentlichen Unterschied gegenüber D zeigte (Fig. 13 I, II).

Dies zusätzliche Korrektionsglied muß seine Ursache in einer nicht linearen Innendruckänderung haben, die durch die Annahme eines sich im ganzen Temperaturbereich im Kondensationsstadium befindlichen Gases erklärt werden kann. Dieses Gas kann aus Resten des Lötmittels oder anderen unerwünschten Verunreinigungen bestehen. Da das quadratische Glied bei den einzelnen Typen stark verschieden ist, müssen in diesen Fällen verschiedene Substanzen dafür verantwortlich gemacht werden. Nur bei der Dosengruppe B ist es gelungen, den Anteil so niedrig zu halten, daß er praktisch vernachlässigt werden kann. Am besten verhält sich von diesen der Typ Bb, der außer bei der ersten Eichung von Bb 1 überhaupt das quadratische Glied kaum erkennen ließ (Fig. 14, Tab. 8).

Wenn sich das Verhalten der Dosen Ca 2, Ca 3, Cb 1, Cb 2, wohl auch noch durch Addition des oben erwähnten Gliedes darstellen läßt (Fig. 15, 16; Tab. 8), so reicht aber hier die Annahme eines kondensierenden Gases nicht mehr aus, weil damit ein Ansteigen von A (T) mit weiter sinkender Temperatur nicht mehr erklärt werden kann. Es muß in dem letzten Teil des Temperaturbereiches entgegen der normalen

Richtung der Wärmeausdehnung eine Streckung der Dose stattfinden, die vorher durch den schneller mit der Temperatur wachsenden Anteil des Dampfdrucks des gesättigten Gases überdeckt wird. Bei der Beschreibung des Dosenmaterials wurde erwähnt, daß bei diesen Dosentypen die Schalenränder eine Kerbe bilden, die mit Lötzinn völlig ausgefüllt ist. Es ist denkbar, daß durch die stärkere Zusammenziehung des Zinnrings gegenüber den Dosenschalen, sich dieser Ring bei sinkender Temperatur zwischen die Schalen schiebt und eine Streckung der ganzen Dose hervorruft. Es ist nicht zu erwarten, daß dies Verhalten bei allen Dosen gleich ist, da es von den Zufälligkeiten der Formung und Lötung der Ränder abhängt.

Der Faktor b ist aus der Theorie als Temperaturkoeffizient des Elastizitätsmoduls, d. h. als Materialkonstante aufzufassen. Trotzdem ist sein Betrag bei einzelnen Dosentypen verschieden, wenn auch nach den Angaben des Herstellers das gleiche Material verwendet wurde. Dies ist besonders deutlich bei den Dosen B b und B a, die sich angeblich nur im Innendruck unterscheiden sollen. Aber auch zwischen D 2 und D 3, die verschiedenen Herstellungsserien entstammen, zeigt sich ein beachtlicher Unterschied. Die Temperaturveränderlichkeit der Elastizität scheint also in hohem Maß von der Herstellung (Walzen usw.) der Bleche und ihrer Verarbeitung (besonders Härtung) abhängig zu sein. Ferner hatte sich, wie im vorigen Kapitel bereits dargelegt wurde (Tab. 6), ein deutlicher Alterungseffekt in dem Sinne gezeigt, daß mit zunehmender Anzahl der Prüfungen sich ein dem Temperaturintervall entsprechender Zustand möglichst geringer Temperaturabhängigkeit der elastischen Kraft einstellte.

Ein Alterungseffekt war aber auch bei der Veränderung des Gliedes $A(T)$ beobachtet worden. Auf die starke Veränderlichkeit dieses Anteils weisen die meisten Autoren hin. Sie wird jedoch in der Regel einem langsamen Undichtwerden der Dosen zugeschrieben. (Wiebe [1], Hergesell und Kleinschmidt [2], Kaßner [11].) In diesem Fall müßte es sich in einem Ansteigen des Betrages der $A(T)$, einem Anwachsen der Temperaturabhängigkeit äußern. Bei den vorliegenden Prüfungen konnte das jedoch nicht eindeutig beobachtet werden. Eher zeigte sich (Tab. 6) ein Absinken und Konstantwerden mit zunehmender Prüfungszahl.

Bemerkenswert ist auch das Ansteigen dieses Korrektionsanteils nach vorhergegangener Erhitzung. Im ganzen muß bemerkt werden, daß

er durch seine starke Streuung eine beträchtliche Unsicherheit in die Korrektionsbestimmung bringt. Ob zur Deutung dieser Erscheinungen chemische Vorgänge im Doseninnern herangezogen werden können, müßte nach einer genauen Analyse des Doseninhalts näher betrachtet werden.

Interessant ist in diesem Zusammenhang, daß die Dosen mit hohem Kompensationsdruck (B b, D, G) (Abb. 13, 14) fast keine Streuung von einer zur andern Prüfung in den $A(\overline{T})$ aufweisen, trotzdem sie nicht anders als die übrigen Dosengruppen behandelt wurden.

Daß innerhalb einer Dosenserie der Koeffizient a schwankt, ist aus der Schwierigkeit des Auspumpvorganges verständlich.

Bei der Dose B a 3 wurde auf folgende Weise nachgeprüft, ob sich die Vermutung der Anwesenheit eines kondensierenden Gasrests auch bei diesen Dosen aufrechterhalten läßt.

Nachdem die Dose bei Zimmertemperatur geeicht worden war, wurde sie im Prüfgerät eingespannt gelassen und durch den Gewindezapfen vorsichtig angebohrt, so daß Luft in das Doseninnere eintreten konnte und die Dose entspannt wurde. Diese Dosenstellung wurde nun registriert. Sie entsprach einem Außendruck von 6,3 mmHg der unverletzten Dose. Da bei diesem Außendruck die Dose entspannt gewesen sein würde, muß es auch gleichzeitig der ursprüngliche Innendruck gewesen sein.

Der Faktor a der Korrektionsformel setzt sich nach (9) aus dem vom Innendruck und dem von der Ausdehnung des Dosenkörpers herrührendem Anteil zusammen. Dabei ist bei den in Tabelle 8 angegebenen Zahlen noch die Gerätekorrektur zu berücksichtigen.

$$a^* = a_{\text{Innendruck}} + a_{\text{Ausdehnung}} + a_{\text{Gerät}}$$
$$+0{,}085 \quad -0{,}035$$

Der Wert 0,085 wurde aus der bekannten Dosenhöhe (17 mm) und dem Ausdehnungskoeffizienten des Dosenmaterials (20×10^{-6}) berechnet. a_G wurde aus den Temperatureichungen der Geräte gewonnen.

Die letzte Prüfung von B a 3 hatte folgende $A(\overline{T})$-Werte geliefert:

bei -74^0: $-6{,}1$ mmHg
bei -49^0: $-4{,}5$ mmHg
bei -24^0: $-2{,}3$ mmHg

Man kann nun annehmen, daß in dem tiefsten Intervall der Partialdruck des kondensierten Gasanteils verschwindend klein ist und die Druckänderung hier nur auf den Luftrest zurückzuführen ist. Unter

Beachtung der Gerätekorrektion und der Ausdehnung des Dosenkörpers errechnet sich ein Innendruck von 3,9 mmHg, der für $T = 0$ auf 4,8 mmHg anwächst. Verfolgt man die Änderung von $A(T)$ linear im Sinne der niedrigsten Temperaturstufe weiter, so ergibt sich eine Zunahme im Bereich -74^0 bis 0^0 von 4,7 mmHg. Die Differenz gegen $A(-74)$ gibt mit 1,4 mmHg den bei $T = 0$ bestehenden Druck der bis dahin verdampften Verunreinigungen an. Der gesamte Innendruck bei $T = 0$ beträgt also

$$4{,}8 + 1{,}4 = 6{,}2 \text{ mmHg}$$

während 6,3 mmHg

bei der Entspannung der Dose festgestellt wurden.

Die Übereinstimmung ist also sehr gut und kann als Bestätigung der gemachten Annahmen gelten.

Kompensationsmethoden.

Hergesell und Kleinschmidt [2] regten an, die Kompensation einer Dose durch Auswahl eines Füllgases zu versuchen, das sich stets bei allen vorkommenden Temperaturen im Sättigungszustand befindet. Der Verlauf von $A(T)$ ließ die Anwesenheit eines solchen Gases in fast allen Dosen vermuten. Durch eine solche Füllung läßt sich also eine Verschiebung des Kompensationsdrucks in Abhängigkeit von der Temperatur erreichen. Wie das Beispiel dieser Dose zeigt, läßt sich die Korrektur noch ausreichend durch die Formel

$$\Delta p = (a^* + b\,p + d^*\,T)\,T \tag{15}$$

darstellen. Soll bei einem Aufstieg diese Dose stets kompensiert sein, so muß immer gelten:

$$(a^* + b\,p^* + d^*\,T) = 0\,! \tag{16}$$

Es muß sich also in ausreichendem Maße die mittlere Temperatur-Druck-Kurve durch eine lineare Funktion annähern lassen. Aus dieser sind die Korrektionskonstanten abzuleiten und ihnen entsprechend solche Dosen herzustellen.

In (8) wurde als Annäherung der mittleren Zustandskurve über Lindenberg bereits eine lineare Beziehung angesetzt. Umgeformt lautet sie:

$$p = 850 + 10\,T$$

aus (16) folgt:

$$p^* = -\frac{a^*}{b} - \frac{d^*}{b}\,\mathsf{T}$$

so daß, wenn

$$b = -4 \times 10^{-4}; \quad a^* = 0{,}34 \text{ und } d^* = 4 \times 10^{-3}$$

sein müssen.

In der Tat scheint, wie ein Vergleich mit den Dosen D 2 und D 3 zeigt, die Herstellung einer Dose mit diesen Konstanten möglich zu sein. Es ist aber zu beachten, daß durch den hohen Wert von a diese Dose verhältnismäßig stark für kleine Temperaturunterschiede empfindlich wird. Aus dem Vergleich der Lindenberger Zustandskurve mit (8) folgt schon als größte Abweichung etwa 10°, die beim einzelnen Aufstieg sicherlich noch wesentlich überschritten wird. Eine Abweichung von 10° würde aber bereits eine Korrektur von etwa 3 mmHg (bei etwa 100 mmHg) notwendig machen. Dieser Betrag kann nicht mehr vernachlässigt werden, so daß eine Kompensation auf diesem Wege nicht erreichbar ist. Auch ist die Verringerung der Korrektur gegenüber einer Dose mit einem Kompensationsdruck von etwa 200 mmHg unbedeutend (Abb. 3).

Noch eine Reihe anderer Versuche wurden bereits gemacht, um eine Kompensation der Temperaturfehler zu erreichen. Von diesen sind besonders wichtig die Methode von Pfeiffer [8], bei der durch Verwendung von Bimetallen im Übertragungsmechanismus auch das druckabhängige Korrektionsglied kompensiert wird und die Methode von Scriba [7]. Ihm ist es durch Verbindung der Dosenmembrane mittels eines Verbindungsrings von anderer Temperaturausdehnung gelungen, die Steifigkeit der Membrane so mit der Temperatur zu ändern, daß durch die auftretenden zusätzlichen Spannungen die temperaturbedingte Elastizitätsänderung der Membrane selber ausgeglichen wird.

Eine eingehende Zusammenstellung verschiedener Kompensationsmethoden gibt Klanke [10].

Alle diese mit besonderen Zusatzgliedern arbeitenden Methoden enthalten eine Fehlerquelle in der verschiedenen thermischen Trägheit dieser Glieder und der Dose selbst.

Eine Methode, die von Jaumotte [9] angegeben und erprobt wurde, vermeidet diese Fehlermöglichkeit, da die Kompensationswirkung durch die Dose selbst hervorgerufen wird.

Jaumotte baute Dosen, deren Innenvolumen sehr stark mit dem Ausschlag veränderlich ist. Es ist dann nicht mehr zulässig, wie es hier bei der Ableitung der Theorie getan werden konnte, den Innendruck in lineare Beziehung zum Ausschlag zu setzen, sondern es muß das Innenvolumen als linear veränderlich mit dem Dosenhub angenommen werden. Dieser Ansatz ist für Dosen, deren Weg streng proportional dem belastenden Druck ist, auch streng gültig. In diesem Fall tritt in der Korrektionsformel ein quadratisch vom Druck abhängiges Glied auf, es existieren also zwei Kompensationsdrucke. Für das Verhältnis der Kompensationsdrucke zu den diesen Drucken entsprechenden Innenvolumina gilt dann nach Jaumotte:

$$p_{c1}/p_{c2} = v_2/v_1$$

Es gelang ihm nun durch richtige Wahl der Volumenveränderlichkeit, die Kompensationsdrucke so zu legen, daß etwa für eine Ballonmeteorographen-Dose sich bei einem einzelnen Aufstieg keine größeren Korrekturen als 1 mb ergab, wenn die Eichung nach der Internationalen Normalatmosphäre durchgeführt wurde. Dadurch, daß die Eichung bei veränderlicher Temperatur und mit einer den wirklichen Verhältnissen nahe kommenden Aufstiegsgeschwindigkeit vorgenommen wurde, konnten elastische Fehler, die aus der Abhängigkeit der Hysteresis von der Temperatur und Aufstiegsgeschwindigkeit herrührten, ausgeschaltet werden. Dies war deshalb nötig, weil die elastischen Fehler einer Stützfederdose bedeutend sind.

Die Tabelle 8 zeigt die guten elastischen Eigenschaften der Dosen B, die besonders auf die Form der Dosenschalen zurückzuführen sind. Diese Dosen würden sich für eine solche Kompensationsmethode besonders gut eignen, da man ihre elastischen Fehler nicht mehr zu berücksichtigen braucht.

Einmal ließe sich unter Beibehaltung der Form eine starke Veränderlichkeit des Innenvolumens dadurch erreichen, daß die Dose im Ruhezustand fast vollkommen durch einen Füllkörper ausgefüllt wird, so daß eine kleine Hubänderung bereits beträchtliche relative Volumänderungen hervorrufen würde. Dabei würde man aber durch die thermischen Veränderungen des Füllkörpers und dessen thermischer Trägheit wieder gewisse Unsicherheiten in Kauf nehmen müssen, ganz abgesehen von der Gewichtsvermehrung, die bei Verwendung in Radiosonden wesentlich wird.

Dasselbe aber könnte auch noch auf folgende Art erreicht werden. Es müßten zwei Dosenschalen zusammengesetzt werden, deren Riefelung nicht wie bisher entgegengesetzt läuft, sondern über allen Punkten der Mittelebene der Dose gleichsinnig ist. Die Schalen müssen im entspannten Zustand so gewölbt sein, daß sie sich nach dem Auspumpen fast berühren. Dadurch wird das Volumen je nach der Güte der Ausführung beliebig mit dem Ausschlag veränderlich.

Die Anwendung aller Kompensationsmethoden setzt voraus, daß kein kondensierendes Gas sich in der Dose befindet und damit nur lineare Temperaturkorrekturen auftreten.

Folgerungen.

a) Die Genauigkeit der Temperaturkorrektur.

Aus den Schwankungen der $A(T)$ und der absoluten Empfindlichkeit folgt, daß eine Angabe der Korrektur mit einer größeren Genauigkeit als etwa $\pm$ ½ mmHg zwecklos ist. Es brauchen also die Konstanten nicht genauer bestimmt zu werden als:

a^* auf 6×10^{-3}
b auf 3×10^{-5}
d^* auf 7×10^{-5} (Tab. 1 c)

Beträgt die Abweichung des linearen $A(T)$ gegenüber einem aus mehr als 2 Temperaturen bestimmten Verlaufs im Intervallmittel ($T = -40^0$) nicht mehr als $-0{,}5$ mmHg ($d^* = 3 \times 10^{-4}$) genügt die lineare Korrektionsformel mit aus den Extremtemperaturen bestimmten Konstanten.

b) Bestimmung der Konstanten.

Die Konstanten sollen durch Eichungen bei Temperaturen, die den wirklich vorkommenden entsprechen, bestimmt werden. Eichungen oberhalb Zimmertemperatur liefern zu große Korrekturen.

Vorher ist eine Temperaturalterung durchzuführen, indem die Dosen an etwa drei Tagen hintereinander im ganzen Temperaturbereich massiert werden.

c) Übertragung der an einzelnen Dosen bestimmten Konstanten auf eine ganze Fabrikationsserie.

Die b-Werte können bei gleicher Vorgeschichte aller Dosen übertragen werden. a ist aus einer genügenden Anzahl Einzeldosen zu bestimmen, um feststellen zu können, ob die Streuung noch innerhalb der zulässigen Genauigkeitsgrenze liegt, also eine Übertragung auf ungeprüfte Dosen erlaubt werden kann.

b schwankt von einer Fabrikationsserie zur anderen. Es ist daher für jede Serie nachzuprüfen. Für die im Wetterdienst gebräuchliche Dose B a beträgt es etwa $-3{,}8 \times 10^{-4}$. Der häufig gebrauchte Wert von $-2{,}8 \times 10^{-4}$ ist zu klein. Er bestätigte sich nur annähernd bei den Dosen B b ($-3{,}0 \times 10^{-4}$).

d) Anbringung der Korrektion.

Der nach Formel (11) auftretende Fehler, der aus dem verschiedenen Weg der Anbringung und Ermittlung der Korrektion entspringt, ist zu vernachlässigen.

e) Verwendung neuer Dosentypen.

Bei Verwendung neuer Dosentypen ist besonders darauf zu achten, daß $A(T)$ linear ist. (Nur einer Herstellerfirma ist dies bisher annähernd gelungen (B).) Dosen, bei denen dies nicht zutrifft, werden am zweckmäßigsten nicht verwendet.

f) Größere Genauigkeit.

Soll eine größere Genauigkeit der Temperaturkorrektur erreicht werden, erscheint es zweckmäßig, den Kompensationsdruck nicht zu niedrig zu wählen. (Geringe Streuung bei B b, D, G.) Voraussetzung ist dann aber möglichst genaue Ermittlung der Dosentemperatur.

g) Temperaturkompensation.

Die beste Kompensation ist die Methode von Jaumotte, weil sie Fehler, die durch verschiedene thermische Trägheit der Kompensationsglieder und der Dose entstehen, ausschaltet. Ihre Anwendbarkeit bei den Dosen B a müßte versucht werden.

h) Elastische Fehler.

Nachdem es gelungen ist, Dosen mit einer Schleifenbreite von weniger als 0,5 mmHg bei $T = 0$ herzustellen, brauchen diese Fehler weder bei der Eichung noch bei der Bestimmung der Temperaturkorrektur berücksichtigt werden.

Zusammenfassung.

Die rechnerische Nachprüfung der Hergesell-Kleinschmidtschen Theorie ergibt trotz der verlangten Genauigkeit von $^1/_4$ mmHg keine Anhaltspunkte über eine notwendige Erweiterung der Korrektionsformel. Die physikalischen Ansätze bleiben gegenüber der mit Stützfeder arbeitenden Dose unverändert.

Es wird ein neues Prüfgerät gebaut und Versuchsanordnung und Prüfmethode dargelegt. 16 Dosen 4 verschiedener Hersteller werden untersucht.

Bei fast allen Dosen zeigt sich im Gegensatz zur Theorie, daß das reine Temperaturglied nicht linear ist. Es ist die Addition eines quadratischen Gliedes erforderlich. Diese Abweichung wird teils durch die Anwesenheit von kondensierenden Gasen, teils durch die Eigentümlichkeit der Dosenherstellung erklärt. An einer Dose wird nachgeprüft, ob die Annahme der Anwesenheit eines solchen Gases neben einem reinen Luftrest erlaubt ist. Das Ergebnis bestätigt die Vermutung. Es ist nicht möglich, durch absichtliche Füllung der Dosen mit einem bei den vorkommenden Temperaturen kondensierenden Gas eine Kompensation zu erreichen.

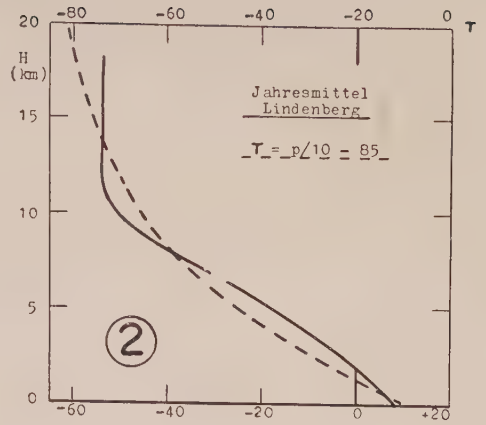
Beide Korrektionsanteile zeigen Alterungseffekte und sind von dem Temperaturintervall, in dem sie gewonnen werden, abhängig. Der nur temperaturabhängige Anteil streut so stark, daß eine größere Genauigkeit der Temperaturkorrektur als $\pm\,^1/_2$ mmHg zwecklos ist. Bei einem Teil der Dosen kann daher der quadratische Anteil vernachlässigt werden.

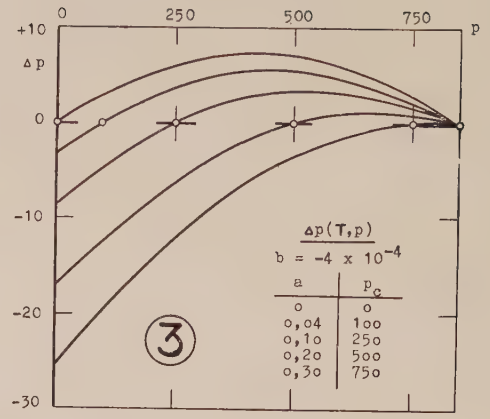
Es wird vorgeschlagen, die Kompensationsmethode von Jaumotte durch entsprechende Änderung des Dosenbaus, aber unter Beibehaltung der elastisch günstigen Form der Schalen, an selbstfedernden Dosen zu versuchen.

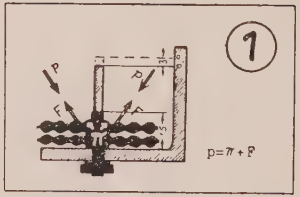
Schließlich werden die Folgerungen für Bestimmung und Anwendung der Korrektion gezogen. Es wird besonders auf die Notwendigkeit der Temperaturalterung fabrikneuer Dosen hingewiesen und darauf aufmerksam gemacht, daß der bisher übliche Wert von $b = -2{,}8 \times 10^{-4}$ zu niedrig ist. Wegen seiner Abhängigkeit von der Bearbeitung des Materials sollte er an jeder Fabrikationsserie nachgeprüft werden.

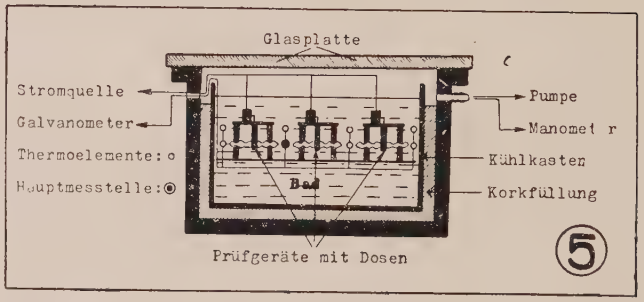
Literatur.

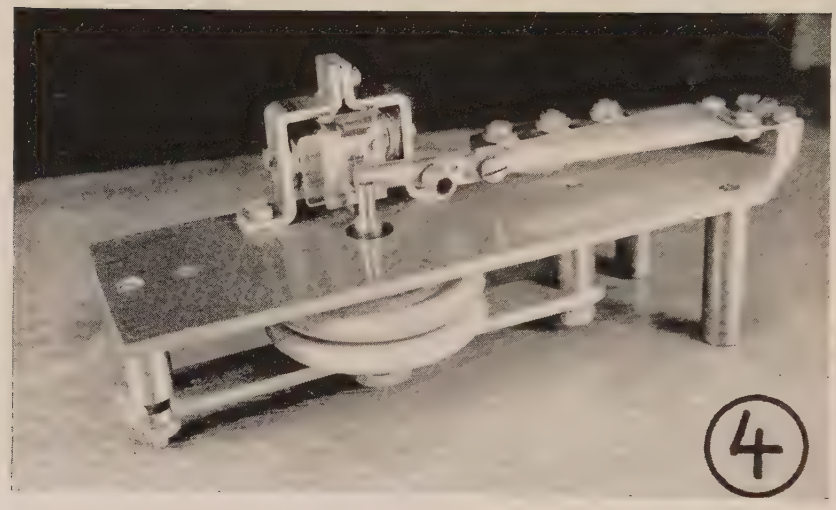
1. Wiebe: Zeitschrift für Instrumentenkunde. 10/1890.
2. Hergesell und Kleinschmidt: Beiträge zur Physik der freien Atmosphäre. 1/1905.
3. Warburg und Heuse: Zeitschrift für Instrumentenkunde. 39/1919.
4. Becker: Meteorologische Zeitschrift. 41/1924.
5. Robitzsch: Beobachtungsmethoden. Berlin 1925.
6. Kleinschmidt: Beiträge zur Physik der freien Atmosphäre. 14/1928.
7. Scriba: Elast. Nachwirkung, Hysteresis und Temperatur-Kompensation an Aneroiden. Dr.-Ing.-Dissertation. Berlin 1929.
8. Pfeiffer: Zeitschrift für Instrumentenkunde. 51/1931.
9. Jaumotte: Inst. Meteorol. Royal Belgique Mémoires. IV/1932.
10. Klanke: Annalen der Hydrographie. 60/1932.
11. Kaßner: Zeitschrift für angewandte Meteorologie. 51/1934.
12. Kleinschmidt: Handbuch der meteorologischen Instrumente. 1935.

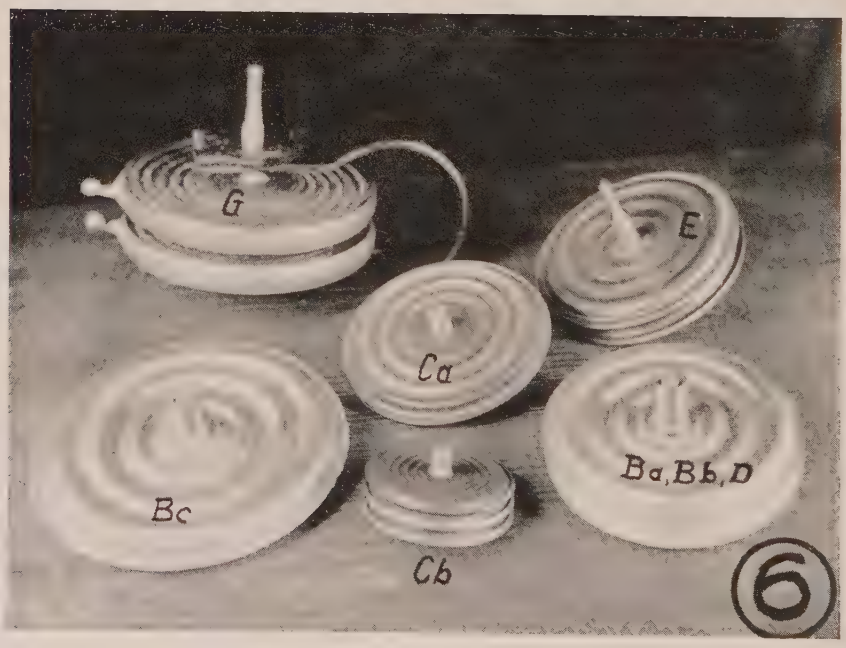

20
15
10
5
0
H (km)
-80
-60
-40
-20
0
T
Jahresmittel
Lindenberg
T = p/10 = 85
2
-60
-40
-20
0
+20

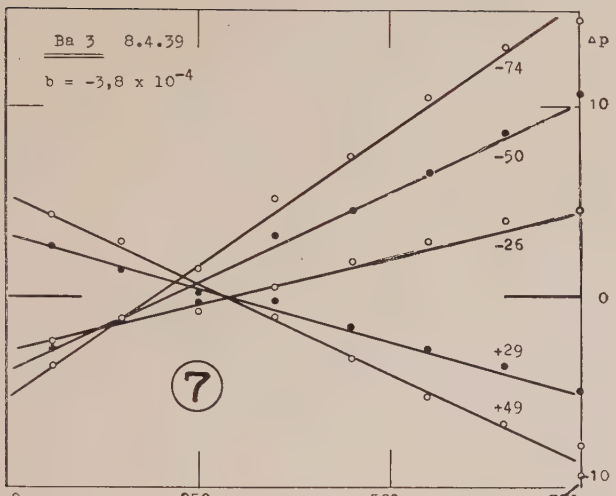

+10
0
-10
-20
-30
Δp
0
250
500
750
p
Δp(T,p)
b = -4 x 10^-4
a | p_c
0 | 0
0,04 | 100
0,10 | 250
0,20 | 500
0,30 | 750
3

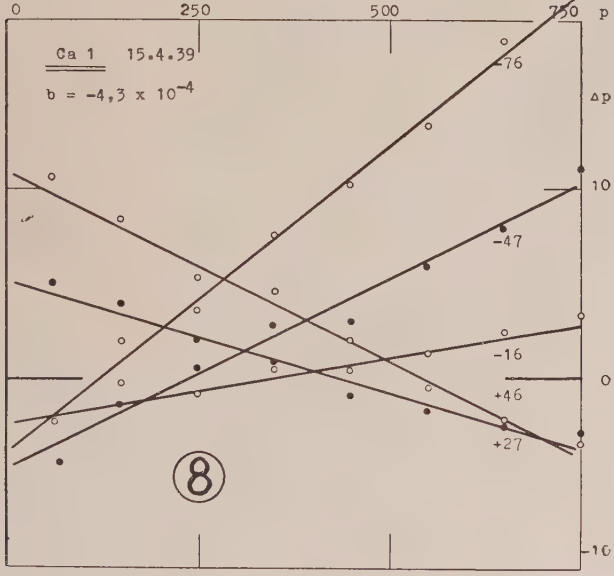

1
p
p
p=π+P

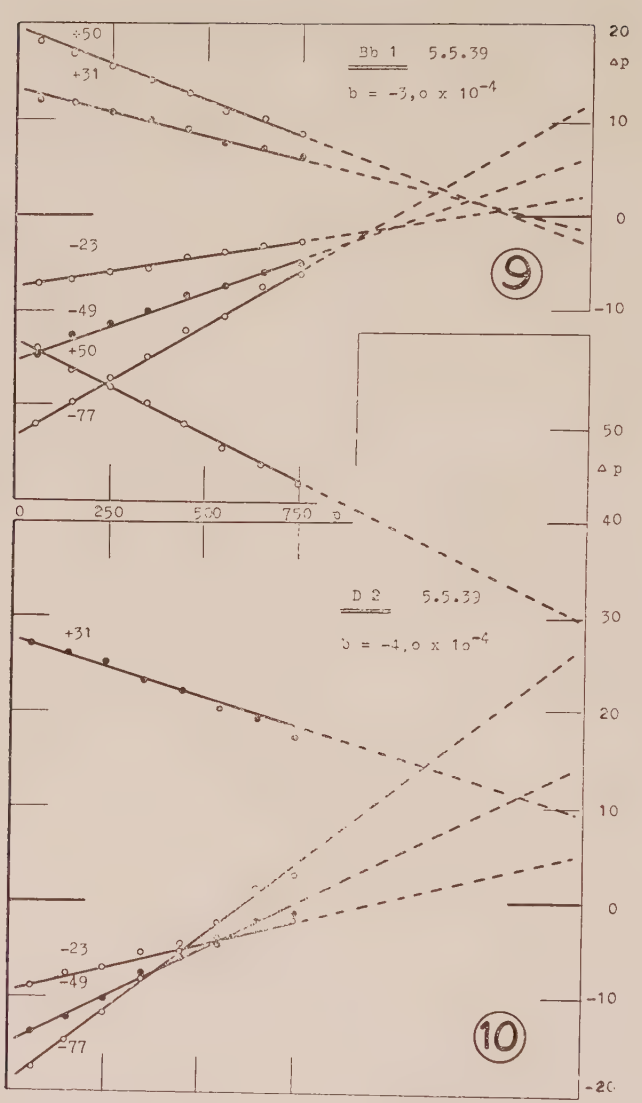

Glasplatte
Stromquelle
Galvanometer
Thermoelemente: o
Hauptmesstelle: ◉
Pumpe
Manometer
Kühlkasten
Korkfüllung
Prüfgeräte mit Dosen
5

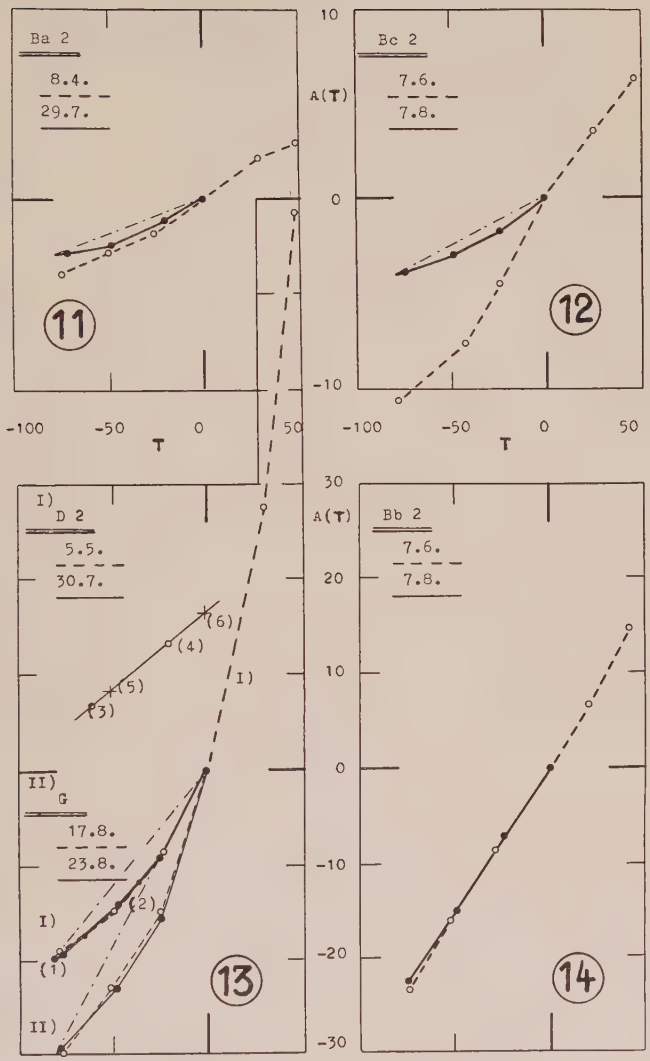

4


G
E
Ca
Ba, Bb, D
Bc
Cb
6


Ba 3 8.4.39
b = -3,8 x 10⁻⁴
Δp
10
0
-10
-74
-50
-26
+29
+49
7
0
250
500
750
p


Ca 1 15.4.39
b = -4,3 x 10⁻⁴
Δp
10
0
-10
-76
-47
-16
+46
+27
8


Bb 1 5.5.39
b = -3,0 x 10⁻⁴
+50
+31
-23
-49
+50
-77
9
Δp
20
10
0
-10
0
250
500
750
D 2 5.5.39
b = -4,0 x 10⁻⁴
+31
-23
-49
-77
10
50
40
30
20
10
0
-10
-20


Ba 2
8.4.
29.7.
11
Bc 2
7.6.
7.8.
12
A(T)
10
0
-10
-100
-50
0
50
T
I)
D 2
5.5.
30.7.
(6)
(4)
(5)
(3)
I)
II)
G
17.8.
23.8.
I)
(2)
(1)
II)
13
30
20
10
0
-10
-20
-30
Bb 2
7.6.
7.8.
14

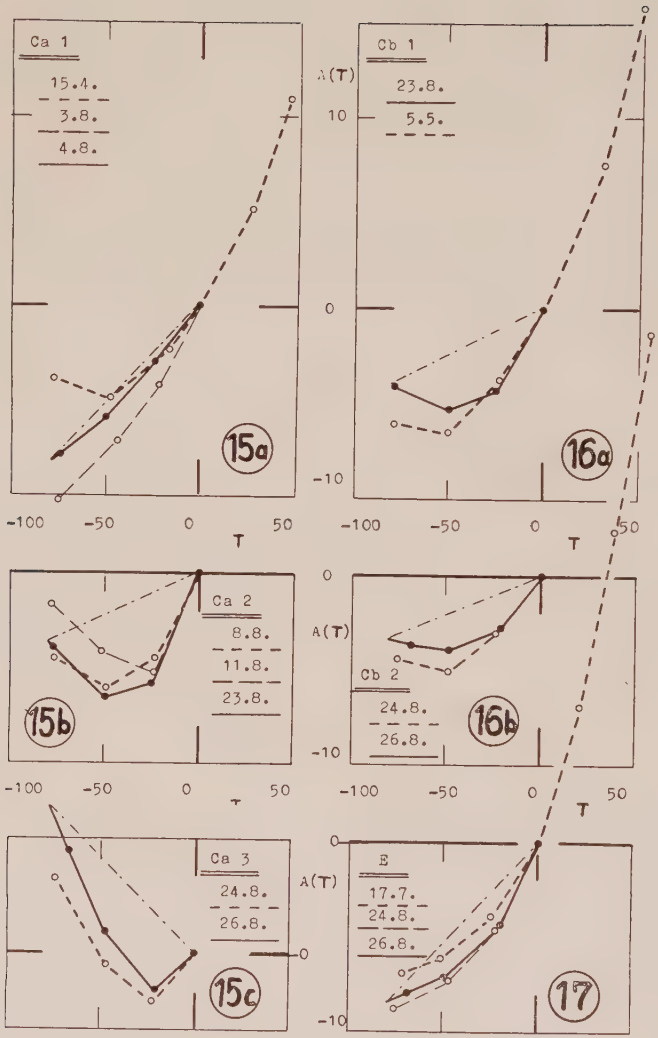

Ca 1
15.4.
3.8.
4.8.
15a
Cb 1
23.8.
5.5.
16a
A(T)
10
0
-10
-100
-50
0
50
T
Ca 2
8.8.
11.8.
23.8.
15b
Cb 2
24.8.
26.8.
16b
Ca 3
24.8.
26.8.
15c
E
17.7.
24.8.
26.8.
17

Tabelle 1.

a) Bedeutung der Konstanten	Größenordnung	Dimension
Ausdehnungskoeffizient der Gase	$\alpha = 4 \times 10^{-3}$	(grad^{-1})
Ausdehnungskoeffizient des Dosenmaterials .	$\gamma = 2 \times 10^{-5}$	(grad^{-1})
Temperaturkoeffizient des Elast.-Moduls . .	$\varepsilon = -4 \times 10^{-4}$	(grad^{-1})

Den mittleren Verhältnissen der untersuchten Dosen entsprechend kann gesetzt werden:

Temperaturveränderliche Dosenhöhe in Druckeinheiten	$P = 5 \times 10^{3}$	(mmHg)
Belastungsabhängigkeit des Innendrucks . .	$\beta = 1{,}4 \times 10^{-4}$	(mmHg^{-1})
Innendruck	$\pi_0 = 20$	(mmHg)

b) Die Koeffizienten der Korrektionsformel

$a = \pi_0(\alpha - \varepsilon) - 5\gamma\pi_0 + P\gamma$	$\approx 8 \times 10^{-2} - 2 \times 10^{-3} + 10^{-1}$
$b = \pi_0\beta(\alpha - 3\gamma) + (\varepsilon + \gamma)$	$\approx 1 \cdot 2 \times 10^{-5} - 4 \times 10^{-4}$
$c = 0$	≈ 0
$d = -\pi_0\gamma(4\gamma + 3\alpha + 2\varepsilon)$	$\approx -5 \times 10^{-6}$
$e = -\pi_0\gamma(3\gamma + 3\alpha)\beta + \gamma^2 + 2\varepsilon\gamma$	$\approx -2 \times 10^{-8}$
$f = -3\pi_0\alpha\gamma^2 + \pi_0\varepsilon\gamma^2$	$\approx -1 \times 10^{-10}$

c)	Maximum T	p	und bei $T = p/10 - 85$	Mindestbetrag	Dimension
a	-85^0			3×10^{-3}	(mmHg grad^{-1})
b	-43^0,	425 mmHg		$1{,}4 \times 10^{-5}$	(grad^{-1})
c	-28^0,	567 mmHg		$2{,}7 \times 10^{-8}$	(mmHg^{-1} grad^{-1})
d	-85^0			$3{,}4 \times 10^{-5}$	(mmHg grad^{-2})
e	-57^0,	283 mmHg		$2{,}7 \times 10^{-7}$	(grad^{-2})
f	-85^0			4×10^{-7}	(mmHg grad^{-3})

Tabelle 2.

Dosenmaterial.

Hersteller	Typ	Kompensationsdruck	Anzahl	∅ mm	Satz	Empfindlichkeit $T = 0$ 600—700 mmHg mm	Empfindlichkeit $T = 0$ 100—200 mmHg mm
B	a	niedrig	3	50	2×	0,440	0,430
	b	hoch	2	50	2×	0,370	0,380
	c	niedrig	2	65	1×	0,414	0,378
C	a	niedrig	3	51	1×	0,184	0,166
	b	niedrig	2	29	3×	0,408	0,814
D		hoch	2	50	2×	0,420	0,422
E		niedrig	1	55	2×	0,447	1,476
G (Neusilberdose mit Stahlfeder)		hoch	1	65	2×	0,664	1,00
			16				

Tabelle 3.

Einzelwerte (b).

Ba 2 8. 4. 1939.

T / p	−3 — 0	−2 — 1	−1 — 2	M
50—450	3,6	3,8	4,0	3,8
150—550	3,9	3,7	4,0	3,9
250—650	3,9	4,1	4,3	4,1
350—750	3,8	3,7	3,8	3,8
M	3,8	3,8	4,0	**3,9**

Bc 2 28. 4. 1939.

T / p	−3 — 0	−2 — 1	−1 — 2	M
50—450	4,6	4,3	4,2	4,4
150—550	4,4	4,5	4,4	4,4
250—650	4,9	4,4	4,5	4,6
350—750	5,0	4,8	4,5	4,8
M	4,7	4,5	4,4	**4,5**

7. 6. 1939.

T / p	−3 — 0	−2 — 1	−1 — 2	M
50—450	3,9	4,0	4,5	4,1
150—550	4,1	4,0	4,0	4,0
250—650	4,4	3,9	4,1	4,1
350—750	4,8	4,3	4,3	4,4
M	4,3	4,0	4,2	**4,2**

$(b) = -b \times 10^4$

Tabelle 4.

Einzelwerte (b).

T / p	**Ca 1** 15. 4. −3 — −1	−2 — 0	M	**Ca 2** 8. 8.			**Ca 3** 24. 8.		
50—450	4,3	4,0	4,2				3,5	4,6	4,0
150—550	4,1	3,8	4,0	5,1	4,8	5,1	4,4	5,3	4,8
250—650	4,7	4,4	4,6	7,0	7,2	7,1	4,4	6,1	5,2
350—750	4,4	4,3	4,4				6,6	6,2	6,4
M	4,4	4,1	**4,3**	6,0	6,0	**6,0**	4,7	5,2	**5,1**

	3. 8.			11. 8.			26. 6.		
100—500	4,5	4,3	4,4	4,2	5,0	4,6	4,5	5,1	4,8
300—700	4,5	4,9	4,7	6,5	6,4	6,4	5,6	6,6	6,1
M	4,5	4,6	**4,6**	5,3	5,7	**5,5**	5,0	5,8	**5,4**

	4. 8.			23. 8.		
100—500	4,3	4,2	4,2	4,2	4,8	4,5
300—700	4,0	4,8	4,4	5,0	5,7	5,4
M	4,2	4,6	**4,3**	4,6	5,3	**4,9**

$(b) = -b \times 10^4$

Tabelle 5.

Einzelwerte (b).

Cb 1 5. 5.			**E** 14. 7.		
4,7	4,6	4,6	3,6	3,4	3,5
4,6	4,2	4,4	3,0	3,3	3,2
4,7	3,7	4,2	4,3	2,5	3,4
5,2	4,0	4,6	3,2	4,3	3,7
4,8	4,1	**4,4**	3,5	3,4	**3,4**

$(b) = -b \times 10^4$

Tabelle 6.

Wiederholungsprüfungen.

Ba 2					Bc 2				
Tag	S_{-3} Skt.	S_0 Skt.	A_{-3} mmHg	(b)	Tag	S_{-3} Skt.	S^0 Skt.	A_{-3} mmHg	(b)
8. 4.	1259,0	1291,2	— 4,0	3,9	28. 4.	1125,0	1164,4	—10,6	4,5
13. 7.	59,8	93,5	— 1,3	3,6	7. 6.	24,9	60,5	— 4,0	4,2
13. 7.	58,3	92,3	— 1,4	3,6	4. 7.	23,0	53,3	— 4,0	3,9
14. 7.	58,2	91,5	— 1,3	3,6	5. 7.	26,7	54,8	— 2,6	3,6
17. 7.		90,4		(4,2)	6. 7.	24,5	54,2	— 2.6	3,6
					13. 7.	26,5	57,7	— 1,5	3,8
	Erwärmung auf 100° C				13. 7.	25,5	57,3	— 2,5	3,7
21. 7.	1254,9	1289,8	— 3,0	4,1	14. 7.	27,5	60,0	— 2,3	3,8
22. 7.	54,5	90,4	— 3,3	4,0	17. 7.		53,8		(4,3)
24. 7.	54,5	90,7	— 3,2	4,1					
29. 7.	55,4	90,2	— 2,9	3,8		Erwärmung auf 100° C			
					22. 7.	1128,6	1164,5	— 4,7	4,4
					24. 7.	25,5	58,1	— 2,3	4,0
					7. 8.	27,0	57,1	— 3,9	3,8

Die (b)-Werte am 17. 7. sind in dem Temperaturintervall 0 bis 2 gewonnen.

Tabelle 7.

$ds/dp = \sigma$ der Höhenmesserdosen.

Cb 1			Cb 2		E	
p	σ	$p\sigma \times 10^{-2}$	σ	$p\sigma \times 10^{-2}$	σ	$p\sigma \times 10^{-2}$
100	4,48	4,48	4,05	4,05	5,50	5,50
200	4,77	9,54	4,00	8,00	4,92	9,84
300	4,26	12,78	3,70	11,10	4,07	12,21
400	3,42	13,68	3,07	12,28	3,32	13,28
500	2,77	13,85	2,53	12,65	2,80	14,00
600	2,35	14,10	2,15	12,90	2,40	14,40
700	2,00	14,00	1,93	13,51	2,12	14,84

Tabelle 8.

Dose	$-A\,(T_{-3})$	$-b \cdot 10^4$	$\frac{a}{a^*}$	$d^* \times 10^3$	max. Diff. $T = -40^0$	Hyst. $T = 0$	p_c	p^*
	mmHg	$grad^{-1}$	mmHg/grad	$mmHg/gr^2$	mmHg	mmHg	mmHg	mmHg
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ba 1	4,7	3,9	0,069		— 0,2	< 0,5	180	
	(6,3)	(3,8)	0,080	0,12				205 + 0,3 T
Ba 2	2,9	3,8	0,038		— 0,6	< 0,5	100	
	(4,0)	(3,8)	0,070	0,42				185 + 1,1 T
Ba 3	6,1	3,7	0,081		— 0,5	< 0,5	220	
	(5,2)	(3,8)	0,108	0,33				290 + 0,9 T
Bb 1	24,3	3,0	0,323		—	< 0,5	1080	
	(23,2)	(3,0)	0,323	—				—
Bb 2	22,5	3,0	0,303		—	< 0,5	1010	
	(23,6)	(3,1)	0,303	—				—
Bc 1	4,1	3,9	0,056		— 0,7	< 0,5	145	
	(9,7)	(4,4)	0,095	0,47				245 + 1,2 T
Bc 2	3,9	3,8	0,051		— 0,6	< 0,5	135	
	(10,6)	(4,7)	0,083	0,43				220 + 1,1 T
Ca 1	7,8	4,3	0,125		— 0,8	1,5	290	
	(3,9)	(4,4)	0,145	0,50				340 + 1,2 T
Ca 2	4,0	4,9	0,046		— 4,8	2	95	
	(4,6)	(6,0)	0,285	2,97				570 + 6,1 T
Ca 3	~~−5,3~~	5,4	−0,074		— 3,2	4	—	
	(−3,9)	(5,1)	0,088	2,03				165 + 3,8 T
Cb 1	4,2	4,2	0,051		— 3,4	1,5	120	
	(6,2)	(4,5)	0,212	2,10				505 + 5,0 T
Cb 2	3,7	4,5	0,044		— 2,0	2,5	100	
	(4,5)	(4,2)	0,143	1,23				320 + 2,7 T
D 2	19,6	4,2	0,247		— 3,2	1,5	585	
	(19,2)	(4,0)	0,410	2,08				975 + 4,9 T
D 3	33,0	4,8	0,425		— 5,6	1,5	890	
	(33,0)	(4,9)	0,705	3,50				1470 + 7,3 T
E	8,0	3,4	0,107		— 1,9	1	315	
	(8,7)	(3,5)	0,205	1,20				600 + 3,5 T
G	29,7	3,7	0,387		— 5,1	5	1050	
	(29,8)	(4,0)	0,642	3,17				1740 + 8,6 T

Lebenslauf.

Am 19. Juni 1915 wurde ich als Sohn des Oberlandwirtschaftskammerrats Dr. med. vet. Andreas Machens und seiner Ehefrau Maria geb. Bieker in Braunschweig geboren. Dort besuchte ich die Volksschule und später das Wilhelm-Gymnasium, das ich Ostern 1934 mit dem Reifezeugnis verließ. Anschließend leistete ich ein halbes Jahr Arbeitsdienst und trat im Herbst auf ein Jahr freiwillig in das Heer ein.

Seit Winter-Semester 1935/36 studierte ich an der Technischen Hochschule Braunschweig die Fächer Mathematik, Physik, Chemie und Meteorologie. Nach drei Semestern setzte ich mein Studium im Sommer 1937 an der Universität Berlin fort, wo ich mich jetzt vornehmlich den Fächern Meteorologie, Geophysik und Physik widmete.

In den Ferien des Jahres 1937 war ich kurze Zeit im praktischen Wetterdienst tätig (Observatorium Brocken, Flughafen Hannover) und im Sommer 1938 hatte ich durch das Institut für Meereskunde Berlin Gelegenheit, an der Golfstrom-Expedition teilzunehmen.

Seit Kriegsbeginn stehe ich im Wehrdienst.

Zu aufrichtigem Dank bin ich Herrn Oberregierungsrat Prof. Dr. Robitzsch für die Anregung und Betreuung dieser Arbeit verpflichtet, und neben den anderen Herren der Abt. III c des R.f.W. möchte ich noch besonders Herrn Regierungsrat Dr. Müller für die Unterstützung, die er mir jeder Zeit entgegenbrachte, danken.